بررسی عددی و تجربی تغییر شکل ورق در فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای لوله‌هایی با نسبت ضخامت به قطر پایین*

محمد مهدی کسایی[۱]   حسن مسلمی نائینی[۲]   مهدی سلمانی تهرانی[۳]   روح اله عزیزی تفتی[٤]   عماد رحیمی[۵]

چکیده *فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای یکی از روش‌های جدید شکل‌دهی غلتکی سرد می‌باشد که به‌طور گسترده برای تولید لوله‌های جوشکاری مقاومتی (ERW) به‌کار می‌رود. استفاده از فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای، علاوه بر تأمین شکل‌دهی آرام ورق در طول فرآیند، سبب کاهش هزینه و زمان تولید می‌گردد. به علت پیچیدگی فرآیند، مطالعات کمی در این زمینه انجام شده است و دانش موجود، بیشتر براساس تجربه بنا شده است. در این مقاله به‌منظور بررسی تغییرشکل ورق در شکل‌دهی قفسه‌ای لوله‌هایی با نسبت ضخامت به قطر پایین، فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای سرد لوله به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود مارک منتات شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به این‌که کمانش لبه ورق از عیوب رایج در فرآیند شکل‌دهی غلتکی لوله‌هایی با نسبت ضخامت به قطر پایین می‌باشد، توزیع کرنش‌های طولی در ناحیه‌های لبه و مرکز ورق بررسی و ایستگاه‌های مستعد برای کمانش لبه ورق معرفی می شوند. هم‌چنین الگوی گل تغییرشکل و انحنای ورق تغییرشکل‌یافته با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، پیش‌بینی شده و اثر هر یک از مراحل شکل‌دهی قفسه‌ای بر روی شکل یا انحنای ورق تغییرشکل یافته مشخص می‌گردد. برای بررسی صحت شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، محیط خارجی، فاصله افقی دو لبه ورق و توان شکل‌دهی در مراحل مختلف شکل‌دهی از نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمد و با داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده در خط تولید مقایسه گردید. انطباق خوب این نتایج، صحت شبیه‌سازی‌ها را تأیید می‌کند.*

واژه‌های کلیدی شکل‌دهی قفسه‌ای لوله، لوله‌های جوشکاری مقاومتی، کرنش طولی، کمانش لبه، الگوی گل، انحنای نسبی

Numerical and Experimental Investigations on Strip Deformation in Cage Roll Forming Process for Pipes with Small Thickness/Diameter Ratio

M. M. Kasaei   H. Moslemi Naeini   M. Salmani Tehrani   R. Azizi Tafti   E. Rahimi

Abstract *Cage roll forming is one of the new methods of cold roll forming process which is widely used for producing ERW pipes. In addition to less production cost and time, using cage roll forming provides smooth deformation on the strip. Few studies can be found about cage roll forming because of its complexity, and the available knowledge is more experience-based and not science-based. In this paper, deformation of pipes with small thickness/diameter ratio is investigated by 3D finite element simulation in Marc-Mentat software. Edge buckling defect in roll forming of pipes with small thickness/diameter ratio is very important. Due to direct effect of longitudinal strain on the edge buckling phenomenon, longitudinal strains at the edge and center line of the deformed strip are investigated and the high risk stands are introduced. Deformation flower pattern and curvature of the deformed strip are predicted using the simulation results and the effects of each cage forming stage on the deformed strip profile are specified. In order to verify the simulation results, circumferential length, opening distance of the two edges and forming power in different forming stages are obtained from the simulations and are compared that of the experimental data which were measured from the production line. A good agreement between the experimental and simulated results is observed*.

Key Words Cage roll forming, ERW pipes, Longitudinal strain, Edge buckling, Flower pattern, Relative curvature

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۸۹/۱۲/۲۵ نسخه پذیرش آن در تاریخ۹۰/۸/۲۲ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۰/۱۰/۲۰ به دفتر نشریه رسیده‌است.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: استاد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(۳) استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(٤) دانشجوی دکتری، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

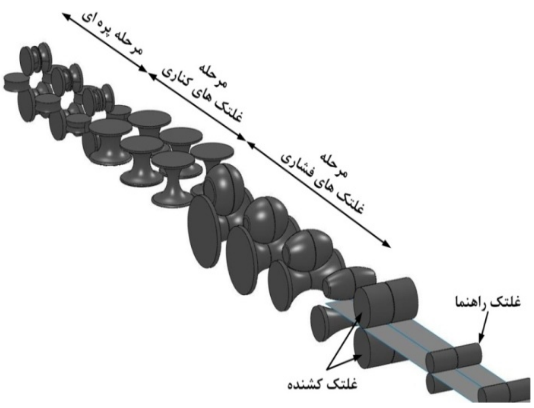
(۵) کارشناس ارشد، گروه ساخت و تولید، بخش مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه

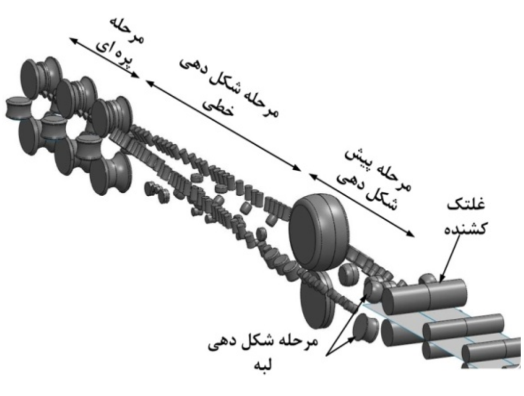
در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله، نوار فلزی با اعمال مقدار شکل‌دهی مشخص در هر ایستگاه به صورت پیوسته و ملایم، شکل مقطع مورد نظر را به خود می‌گیرد. هر ایستگاه با توجه به تغییری که در پروفیل ورق ایجاد می‌کند از تعداد مشخصی غلتک با پروفیل خاص تشکیل شده است. چندین دهه است که فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد خود را به عنوان یکی از فرآیندهای پرکاربرد شکل‌دهی فلزات معرفی کرده است؛ از جمله کاربردهای آن می‌توان به تولید لوله‌های فلزی و پروفیل‌هایی با مقاطع بسته و باز اشاره کرد.

در حال حاضر دو فرآیند شکل‌دهی غلتکی‌سرد به صورت گسترده برای تولید لوله‌های جوشکاری مقاومتی (Electric Resistance Welded Pipe) مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از شکل‌دهی سنتی (Conventional roll-forming) و شکل‌دهی قفسه‌ای (Cage roll-forming). در شکل‌دهی سنتی (شکل ۱)، ورق فلزی به‌وسیله پروفیل غلتک‌های افقی و عمودی که در ایستگاه‌های مختلف نصب شده‌اند، به‌تدریج شکل لوله را به خود می‌گیرد. از آنجایی که تغییرشکل به‌وسیله پروفیل غلتک‌های افقی و عمودی انجام می‌گیرد، با تغییر قطر لوله، نیاز است که کلیه غلتک‌های خط‌تولید تعویض شوند. این امر مستلزم صرف هزینه بالا برای ساخت غلتک‌های مختلف و وقت زیاد برای تعویض غلتک‌ها می‌باشد. به علت ماهیت تغییرشکل در فرآیند شکل‌دهی سنتی لوله، ورق تغییرشکل‌یافته در این فرآیند بسیار مستعد بروز عیوبی مانند کمانش و چین‌خوردگی در ناحیه لبه و هم‌چنین برگشت‌فنری می‌باشد [1,2]. بنابراین، با توجه به مشکلات ذکر شده، شیوه‌ای جدید از شکل‌دهی غلتکی سرد با نام شکل‌دهی قفسه‌ای برای تولید لوله‌های جوشکاری مقاومتی توسعه پیدا کرد.

در شکل‌دهی قفسه‌ای لوله‌های جوشکاری مقاومتی، ورق فلزی به‌صورت پیوسته، به‌وسیله غلتک‌های کوچکی به‌نام غلتک‌های قفسه‌ای که در تماس با سطح خارجی ناحیه لبه ورق می‌باشد، به مقطع دایره‌ای تبدیل می‌شود. چیدمان غلتک‌ها در فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای به‌گونه‌ای است که ورق تحت یک تغییرشکل سراشیبی (Downhill forming) تا قبل از مرحله پره‌ای قرار می‌گیرد. فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای، همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، از پنج مرحله اصلی تشکیل شده است که عبارتند از مرحله غلتک کشنده (Pinch roll unit)، مرحله شکل‌دهی لبه (Edge bending)، مرحله پیش شکل‌دهی (Pre-forming)، مرحله شکل‌دهی خطی (Linear forming) و مرحله شکل‌دهی پره‌ای (Fin-pass).



شکل ۱ شکل‌دهی سنتی لوله



شکل۲ شکل‌دهی قفسه‌ای لوله

پژوهشگران زیادی در زمینه شکل‌دهی سنتی لوله‌های جوشکاری مقاومتی به تحقیق پرداخته‌اند. کیوچی [3] برای نخستین بار از یک روش تحلیلی که در آن از یک تابع شکل سینوسی استفاده شده بود، برای شبیه‌سازی شکل‌دهی سنتی استفاده کرد. در ادامه، کیوچی و کوداباشی [4] برای بهینه‌سازی الگوی گل لوله گرد، دو روش یکنواخت‌کردن بیشینه کرنش طولی بین ایستگاه‌ها و یکسان کردن توان لازم برای تغییرشکل بین ایستگاه‌ها را پیشنهاد کردند. کیوچی و همکارانش [5] به‌وسیله انجام یک سری آزمایش‌های تجربی، برنامه ایستگاهی مناسبی را برای ایجاد تغییرشکل بهینه در مرحله پره‌ای ارایه دادند. واکر و پیک [6,7] روش مدل‌سازی جدیدی برای ورق تغییرشکل‌یافته معرفی کردند. در این روش از بی-اسپیلاین برای تعریف هندسه ورق تغییرشکل‌یافته استفاده شد. افزون بر این آنها توانستند کرنش‌ها را نیز محاسبه کنند. مسلمی نائینی [۸] با ادامه و گسترش روش کیوچی برنامه‌ای برای طراحی غلتک‌های شکل‌دهی سرد لوله تدوین کرد. لیو و همکارانش [9] و هان و همکارانش [10] روش نوار محدود را برای تحلیل فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله‌های جوشکاری مقاومتی براساس روش لاگرانژین گسترش دادند.

در سال‌های اخیر روش اجزای محدود نیز برای تحلیل فرآیند شکل‌دهی غلتکی‌سرد مورد استفاده قرار گرفته است. کیوچی و وانگ [11] کد دوبعدی و سه‌بعدی المان محدودی با فرض الاستیک-پلاستیک براساس روش ضمنی استاتیکی و صریح دینامیکی تهیه کردند و مطالعه جامعی بر روی فرآیند شکل‌دهی غلتکی انعطاف‌پذیر لوله‌های جوشکاری مقاومتی انجام دادند. هانگ و همکارانش [12] برنامه‌ای سه‌بعدی با نام SHAPE-RF براساس روش اجزای محدود تهیه کردند که برای تحلیل فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد مقاطع کانالی و دایره‌ای کاربرد دارد. کیم و همکارانش [13] فرآیند شکل‌دهی غلتکی سنتی را به کمک نرم‌افزار SHAPE-RF شبیه‌سازی و شکل لبه ورق اولیه را بر اساس رگریسیون درجه دو پیش‌بینی نمودند. سلمانی تهرانی و همکارانش [14] به بررسی کمانش لبه ورق در ایستگاه‌های ابتدایی شکل‌دهی سنتی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus پرداختند و حدی را برای زاویه پروفیل، به‌منظور جلوگیری از کمانش لبه معرفی کردند. از جمله پژوهش‌های انجام گرفته در شکل‌دهی قفسه‌ای سرد لوله نیز می‌توان به کار تجربی یوکویاما و همکارانش [1] اشاره کرد. در این پژوهش، برای به‌دست آوردن دانشی جامع در فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای، رفتار تغییرشکل ورق براساس تاریخچه کرنش، موقعیت لبه و مرکز ورق و الگوی گل تغییرشکل مطالعه شد. اگرچه پژوهشگران زیادی با استفاده از روش‌های مختلف شبیه‌سازی به بررسی تغییرشکل ورق در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله پرداخته‌اند اما بیشتر این تحقیقات بر روی شکل‌دهی سنتی تمرکز دارد و تنها تعداد محدودی پژوهش در زمینه شکل‌دهی قفسه‌ای آن‌هم به صورت تجربی گزارش شده است. شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای به علت طول زیاد ناحیه تغییرشکل، تعداد زیاد غلتک‌های شکل‌دهی (بیش از ۱۰۰ غلتک) و تماس پیچیده بین ورق و غلتک‌ها به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیندهای شکل‌دهی شناخته می‌شود. جیانگ و همکارانش [2] در سال ۲۰۰۹ برای اولین بار فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای را برای تولید لوله‌ای با قطر خارجی ۳۲۵ میلی‌متر و ضخامت ۱۰/۳ میلی‌متر (T/D=3.1%) در نرم‌افزار اجزای محدود LS-DYNA به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند و تغییرشکل ورق را در این فرآیند مورد بررسی قرار دادند.

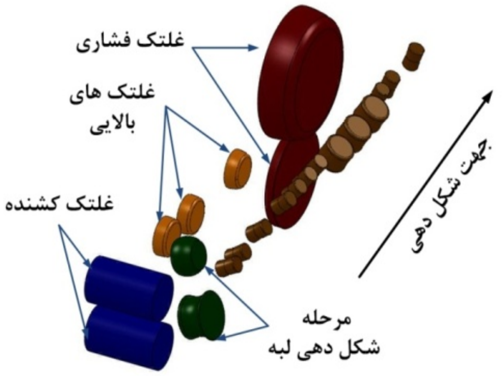
از آن‌جا که با کاهش نسبت ضخامت به قطر، احتمال ایجاد عیوب شکل‌دهی به‌ویژه کمانش لبه و برگشت‌فنری ورق به شدت افزایش می‌یابد، یکی از

مشکلات رایج در کارخانه‌های لوله‌سازی، تولید لوله‌های جوشکاری مقاومتی با نسبت ضخامت به قطر پایین می‌باشد. در این پژوهش، برای بررسی تغییرشکل ورق در فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای لوله‌هایی با نسبت ضخامت به قطر پایین، خط‌تولید کارخانه نورد و لوله صفا برای شکل‌دهی لوله‌ای با قطر خارجی ٦٠٩/٦ میلی‌متر و ضخامت ٧/٩٥ میلی‌متر (T/D=1.3%)، به‌صورت الاستیک-پلاستیک در نرم‌افزار اجزای محدود مارک منتات (Marc Mentat) شبیه‌سازی شد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، انحنای ورق تغییرشکل‌یافته پیش‌بینی شد و اثر هر یک از مراحل شکل‌دهی قفسه‌ای بر روی پروفیل ورق تغییرشکل‌یافته مشخص گردید. با توجه به تأثیر مستقیم کرنش‌های طولی بر روی پدیده کمانش لبه، کرنش طولی در ناحیه‌های لبه و مرکز ورق مورد بررسی قرار گرفت و ایستگاه های مستعد برای ایجاد کمانش لبه ورق معرفی شدند. هم‌چنین با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، هندسه ورق تغییرشکل‌یافته در مراحل مختلف شکل‌دهی و توان شکل‌دهی در مرحله پره‌ای پیش‌بینی شد که انطباق خوبی با نتایج اندازه‌گیری‌های تجربی نشان داد.

مدل‌سازی اجزای محدود فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای

در این مقاله مدل اجزای محدودی از فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای سرد لوله در نرم‌افزار مارک منتات، برای بررسی تغییرشکل ورق در این فرآیند ایجاد شد. به علت ویژگی تقارن شکل‌دهی قفسه‌ای، تنها نیمی از عرض ورق و غلتک‌ها مدل و شبیه‌سازی شدند.

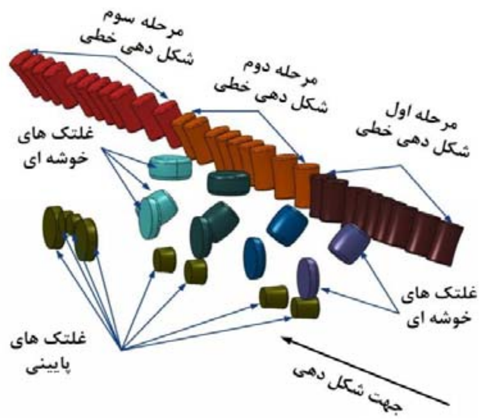
مدل خط تولید. مدل فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای که مطابق با خط لوله کارخانه نورد و لوله صفا ایجاد شده است، دارای هر پنج بخش اصلی شکل‌دهی قفسه‌ای یعنی: مرحله غلتک کشنده، مرحله شکل‌دهی لبه، مرحله پیش شکل‌دهی، مرحله شکل‌دهی خطی و مرحله پره‌ای می‌باشد. مرحله غلتک کشنده، نیروی پیشروی ورق را تأمین می‌کند و از دو غلتک تخت بالایی و پایینی تشکیل شده است. این غلتک‌ها هیچ تغییری در پروفیل ورق ایجاد نمی‌کنند. مرحله شکل‌دهی لبه که دارای دو غلتک بالایی و پایینی در هر طرف می‌باشد، بلافاصله بعد از غلتک‌های کشنده قرار می‌گیرد و وظیفه تغییرشکل ناحیه لبه ورق را برعهده دارد. مرحله پیش شکل‌دهی، مطابق شکل (٣) از سیزده غلتک قفسه‌ای در دو طرف ورق، سه غلتک بالایی و یک غلتک فشاری، که در تماس با ناحیه مرکزی ورق می‌باشند، تشکیل شده است.



شکل٣ مرحله غلتک کشنده، شکل‌دهی لبه و پیش شکل‌دهی

بخش شکل‌دهی خطی، خود به سه قسمت تقسیم شده است. مطابق شکل (٤) مراحل اول و دوم شکل‌دهی خطی، هر کدام دارای یک مجموعه نه تایی از غلتک‌های قفسه‌ای در هر طرف ورق می‌باشند و مرحله سوم شکل‌دهی خطی که تا قبل از مرحله پره‌ای ادامه می‌یابد، یازده غلتک قفسه‌ای دارد. برای شکل‌دهی لوله‌هایی با قطر ٦٠٩/٦ میلی‌متر به علت محدودیت در ساخت غلتک و هم‌چنین بالا بردن قابلیت شکل‌دهی، از چهار مجموعه غلتک خوشه‌ای استفاده می‌شود. هر کدام از مجموعه غلتک‌های خوشه‌ای دارای سه تا پنج غلتک هستند که در تماس با سطح داخلی ناحیه مرکزی، فلنج و لبه ورق قرار دارند. هم‌چنین هشت غلتک پایینی که در تماس با سطح خارجی ناحیه مرکزی ورق قرار می‌گیرند، بخشی

از وظیفه شکل‌دهی ورق در مرحله شکل‌دهی خطی را بر عهده دارند.

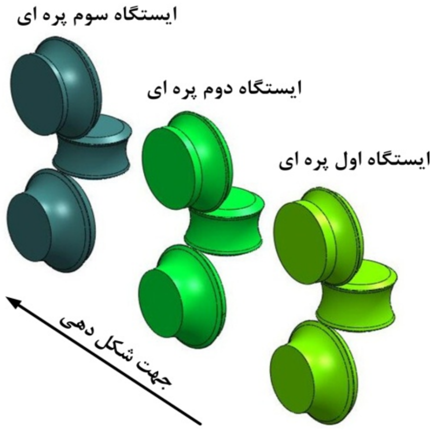


شکل ٤ مرحله شکل‌دهی خطی

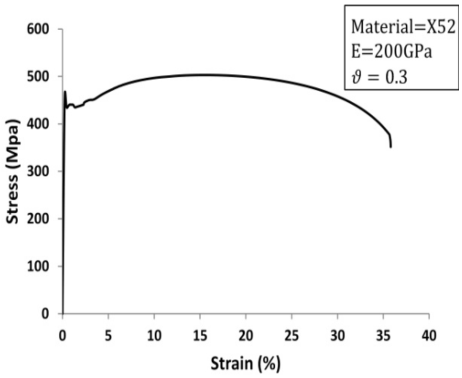
مرحله پره‌ای آخرین مرحله شکل‌دهـی تـا قبـل از مرحله جوش است و هر یـک از ایسـتگاه‌هـای پـره‌ای دارای یک غلتک بالایی، یک غلتک پایینی و دو غلتـک کناری می‌باشند که در شکل (٥) نشان داده شده است.

خواص مواد ورق. بـرای معرفـی خـواص مـواد هـر جنس، مدول الاستیک و ضـریب پواسـون آن از نتـایج آزمایش کشش به‌دست آمد و در نرم‌افزار مارک منتـات وارد شد که برای ورقی از جنس X52 بـه‌ترتیـب ۲۰۰ گیگا پاسکال و ۰/۳ است. برای تعیین تنش تسلیم ورق تحت شـرایط بارگـذاری معکـوس، قـانون کارسـختی ایزوتروپیک مورد استفاده قرار گرفته و هم‌چنین نمودار تنش حقیقی - کرنش پلاستیک حقیقی برای نـرم‌افـزار تعریف شد. منحنی تنش-کـرنش مهندسـی بـرای ورق X52 مطابق شکل (٦) می‌باشد.

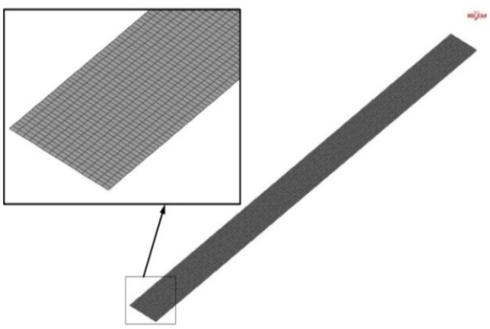
مدل اجزای محدود. در مدل اجزای محـدود، مطـابق شکل (۷) ورق به ۵۷۰۰ المان پوسته‌ای چهـار گـره‌ای تقسیم شـد. طـول، عـرض و ضـخامت ورق اولیـه بـه ترتیب ۲٤۰۰۰، ۱۹۱٤ و ۷/۹۵ میلی‌متر می‌باشند.



شکل ٥ مرحله شکل‌دهی پره‌ای



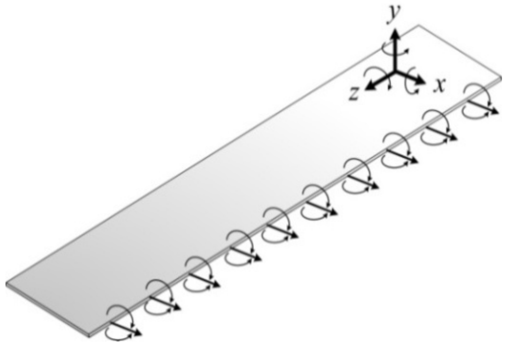
شکل ٦ منحنی تنش-کرنش برای ورقی از جنس X52



شکل ۷ نمایی از ورق شبکه‌بندی شده

از آن‌جایی که تغییرشکل غلتک‌هـا در مقایسـه بـا ورق بسیار ناچیز می‌باشد، غلتک‌ها صلب در نظر گرفته شدند. ورق در اثر نیروی اصـطکاک بـه داخـل فضـای غلتک‌ها کشیده می‌شود و در جهت شکل‌دهی حرکـت

می‌کند. در نتیجه شرایط اصطکاکی بین غلتک و ورق با استفاده از قانون کلمب مدل و مقدار ضریب اصطکاک ۰/۱ در نظر گرفته شد. در این مدل سرعت دورانی غلتک‌های محرک به گونه‌ای در نظر گرفته شد که سرعت خطی ورق برابر با 15m/min شود. به گره‌هایی که در مرکز ورق قرار دارند شرط مرزی به گونه‌ای اعمال گردید که خاصیت تقارنی فرآیند نسبت به صفحه Y-Z لحاظ گردد. بنابراین جابه‌جایی در جهت X و دوران حول محورهای Y و Z برای این گره‌ها صفر فرض شد (شکل ۸). تمام درجات آزادی غلتک‌ها نیز به جز دوران، حول محور X گرفته شد. با توجه به ماهیت شبه‌استاتیک فرآیند، شبیه‌سازی به‌صورت استاتیکی انجام گرفت. هم‌چنین برای انجام این شبیه‌سازی از حلگر صریح استفاده شد.

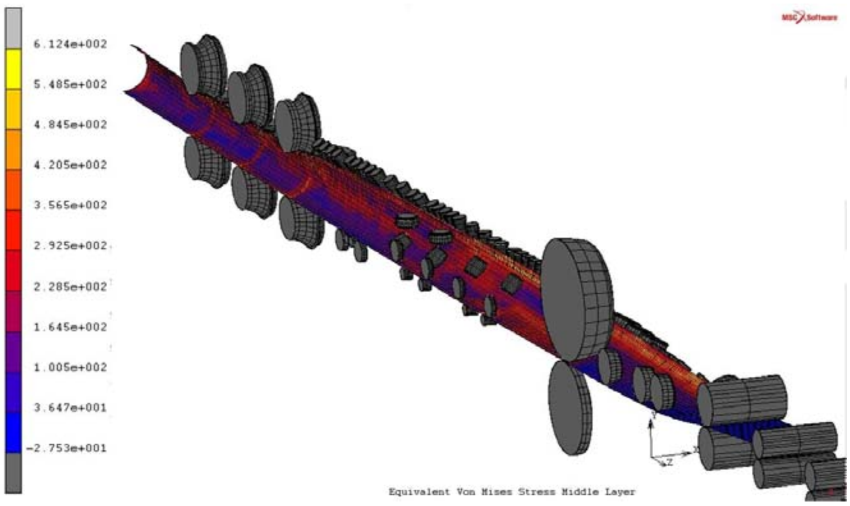


شکل ۸ شرایط مرزی ورق برای اعمال شرایط تقارنی

نتایج و بحث

شکل (۹) نمایی از شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای سرد لوله را در نرم‌افزار مارک‌منتات نشان می‌دهد که در ادامه با استفاده از نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، تغییرشکل ورق بررسی می‌شود.

کرنش طولی. شکل (۱۰) کرنش طولی در ناحیه لبه ورق در مراحل مختلف شکل‌دهی قفسه‌ای را نشان می‌دهد. در ابتدای تغییرشکل، کرنش طولی لبه ورق در مرحله شکل‌دهی لبه به‌شدت افزایش پیدا می‌کند؛ زیرا در این مرحله تنها ناحیه لبه ورق شکل گرفته است و انحنای آن، تقریباً برابر با انحنای لوله نهایی می‌شود. از این رو خطوط جریان ناحیه لبه ورق در مقایسه با مرکز ورق به شدت افزایش طول می‌یابد. تمرکز شکل‌دهی در ناحیه لبه، سبب کارسختی این ناحیه و افزایش تنش تسلیم ورق می‌گردد. در نتیجه در مراحل بعدی تغییرشکل، لبه ورق به راحتی دچار تغییرشکل پلاستیک نمی‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در ناحیه‌ای که ورق در تماس با غلتک‌های قفسه‌ای است کرنش در لبه بسیار ناچیز است و در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. در واقع غلتک‌های قفسه‌ای سبب تغییرشکل آرام و هم‌چنین جلوگیری از افزایش ناگهانی طول خطوط جریان ناحیه لبه ورق می‌شوند.



شکل ۹ شبیه‌سازی شکل‌دهی قفسه‌ای (کانتور تنش فون میزز)

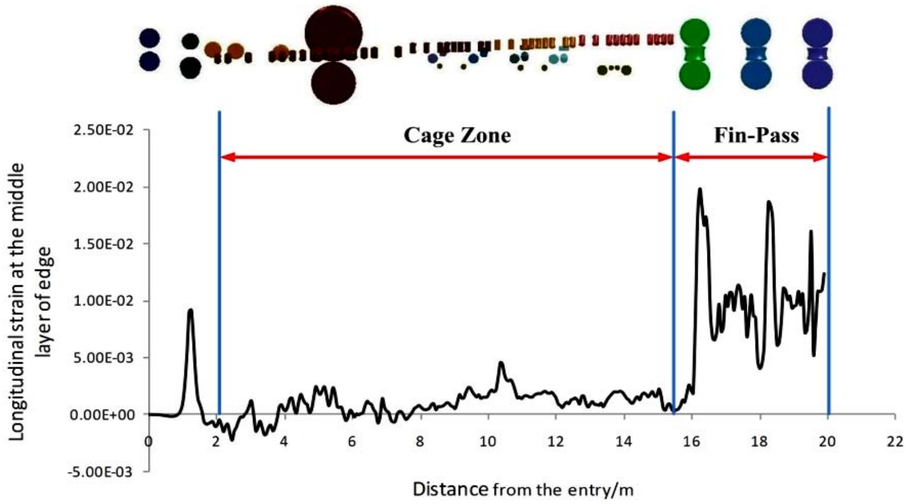
با ورود ورق به هر یک از ایستگاه‌های پره‌ای، کرنش طولی در لبه با افزایش شدیدی همراه و به صورت قله‌هایی در نمودار کرنش طولی ظاهر می‌شود. کرنش طولی پس از خارج شدن ورق از هر ایستگاه دوباره کاهش می‌یابد اما با این وجود کرنش‌های طولی در لبه ورق به صورت پلاستیک باقی می‌ماند. این پدیده را می‌توان به این صورت توجیه کرد که با ورود ورق به هر یک از ایستگاه‌های پره‌ای، به علت کاهش در عرض ورق، ماده ناچار به سیلان زیاد در راستای طولی می‌شود. در نتیجه کرنش در راستای طولی به شدت افزایش پیدا می‌کند. بیشترین کرنش طولی در ناحیه لبه در ایستگاه اول روی می‌دهد و برابر با ۰/۰۱۹۷ می‌باشد که ناشی از کاهش عرضی بیشینه‌ای است که در این ایستگاه، به ورق اعمال می‌گردد. از آن‌جایی که ایستگاه سوم پره‌ای، وظیفه یک‌نواخت کردن انحنا و موقعیت دهی لبه ورق برای مرحله جوش را بر عهده دارد، کاهش عرضی در این مرحله بسیار کمتر از دو مرحله دیگر پره‌ای می‌باشد؛ بنابراین کرنش طولی ناحیه لبه در ایستگاه سوم پره‌ای کمتر از دو ایستگاه دیگر پره‌ای است.

شکل (۱۱) توزیع کرنش طولی در مقطع عرضی ورق تغییرشکل یافته را در سه ایستگاه مرحله پره‌ای نشان می‌دهد. به علت توزیع غیریکنواخت کاهش عرضی در هر یک از ایستگاه‌های پره‌ای و تمرکز آن در ناحیه لبه ورق، کرنش طولی در راستای عرضی با نزدیک شدن به ناحیه لبه زیاد می‌شود.

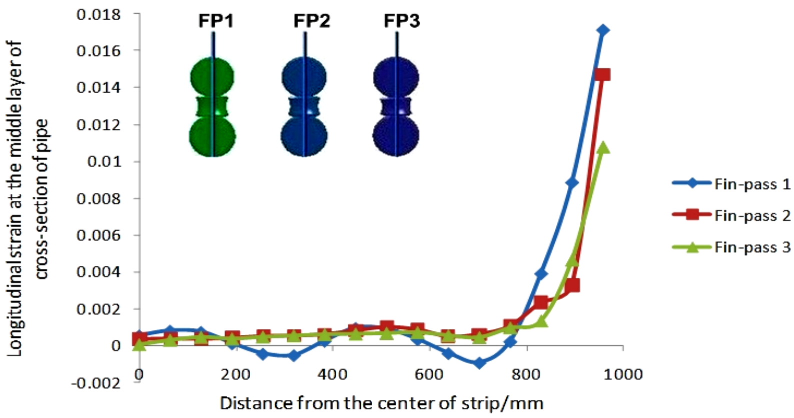
مطابق شکل (۱۲) کرنش طولی در ناحیه مرکزی ورق از محدوده الاستیک، خارج نمی‌شود و به علت طبیعت فرآیند بعد از غلتک فشاری، کرنش‌ها از حالت کششی به فشاری تغییریافته و دوباره با ورود ورق به مرحله پره‌ای، به حالت کششی برمی‌گردد.

کمانش لبه ورق یکی از عیوب رایج در فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله می‌باشد. در این فرآیند هنگامی که در یک ایستگاه شکل‌دهی طول خطوط جریان ناحیه لبه ورق در مقایسه با نواحی دیگر به صورت محلی افزایش می‌یابد پتانسیل ایجاد کمانش لبه ورق فراهم می‌شود. زیرا پس از خروج از ایستگاه شکل‌دهی به علت اختلاف طول خطوط جریان در ناحیه لبه و مرکز ورق و هم‌چنین اثر ایستگاه بعدی تغییرشکل، ناحیه لبه ورق تحت فشار قرار می‌گیرد و با افزایش نیروی فشاری از مقدار حدی مشخصی، کمانش لبه ورق روی می‌دهد.

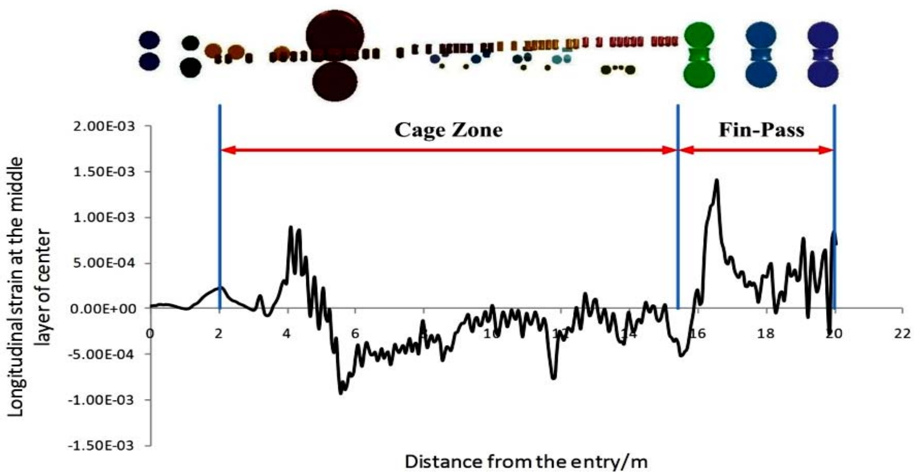
مقایسه کرنش‌های طولی در ایستگاه شکل‌دهی لبه نشان می‌دهد که تفاوت کرنش طولی در ناحیه لبه و مرکز ورق زیاد می‌باشد. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش زاویه پروفیل غلتک در این ایستگاه از حد مشخصی، کمانش لبه ورق روی خواهد داد. در محدوده‌ای که ورق در تماس با غلتک‌های قفسه‌ای است، به علت استفاده از شکل‌دهی سراشیبی و هم‌چنین غلتک‌های قفسه‌ای، کرنش‌های طولی در لبه و مرکز ورق به هم نزدیک بوده و در محدوده الاستیک باقی می‌مانند. اما با ورود ورق به مرحله پره‌ای، به دلیل تمرکز کاهش عرضی در ناحیه لبه، تفاوت کرنش‌های طولی در لبه و مرکز ورق به‌شدت افزایش می‌یابد. بنابراین با توجه به اختلاف زیاد کرنش طولی لبه و مرکز ورق در ایستگاه‌های شکل‌دهی لبه و پره‌ای، می‌توان این مراحل را به عنوان مکان‌های مستعد برای کمانش لبه ورق معرفی کرد. شکل (۱۳) کانتور کرنش طولی را در مرحله پره‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است در اثر اعمال بیش از اندازه کاهش‌عرضی و در نتیجه اختلاف زیاد کرنش طولی در ناحیه لبه و مرکز ورق در ایستگاه دوم پره‌ای، کمانش لبه روی داده است.



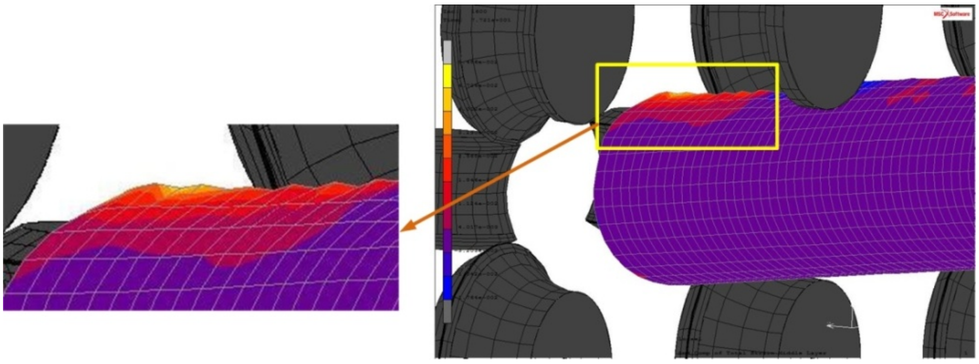
شکل ۱۰ کرنش طولی در لبه ورق تغییرشکل‌یافته در فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای



شکل ۱۱ توزیع کرنش طولی در مقطع عرضی ورق تغییرشکل یافته در مرحله پره‌ای

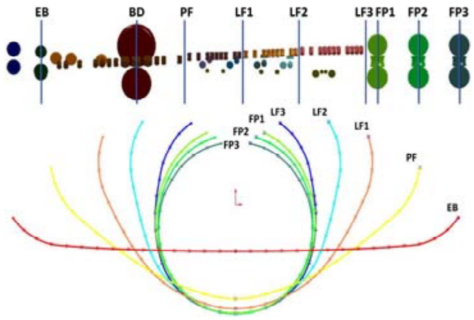


شکل ۱۲ کرنش طولی در مرکز ورق تغییرشکل‌یافته در فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای



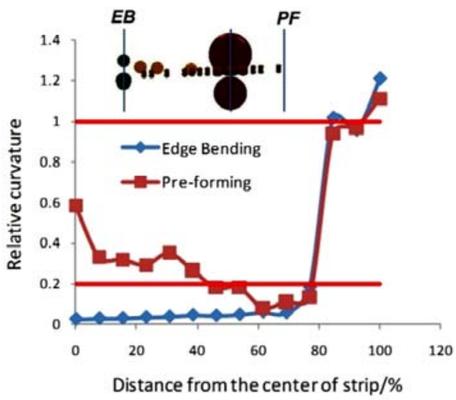
شکل۱۳ پدیده کمانش لبه در مرحله پره‌ای

الگوی گل تغییرشکل. الگوی گل تغییرشکل از روی هم قرار دادن مقطع عرضی ورق تغییرشکل یافته در مراحل مختلف شکل‌دهی به‌دست می‌آید و نشانگر توزیع میزان شکل‌دهی در طول خط تولید است. شکل (۱٤) الگوی گل تغییرشکل در مراحل مختلف شکل‌دهی قفسه‌ای را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با توجه به نحوه‌ی تماس غلتک‌ها با ورق در مراحل مختلف، در هر مرحله بخش‌های به‌خصوصی از عرض ورق شکل می‌گیرد. تا قبل از مرحله پره‌ای، ناحیه‌هایی از ورق وجود دارند که به علت عدم اعمال شکل‌دهی، انحنای ناچیزی دارند. زیرا در شکل‌دهی قفسه‌ای برخلاف شکل‌دهی سنتی لوله تغییرشکل به‌وسیله پروفیل غلتک‌ها صورت نمی‌گیرد و ورق در اثر تماس محدود با غلتک‌ها تغییرشکل می‌یابد. به‌منظور بررسی تغییرات انحنا در راستای عرضی در مراحل مختلف شکل‌دهی، فاکتور بی‌بعد انحنای نسبی به‌صورت نسبت انحنای ورق تغییرشکل‌یافته به انحنای لوله نهایی تعریف شد. هر چه انحنای نسبی در عرض ورق به یک نزدیک‌تر و توزیع آن یکنواخت‌تر باشد پروفیل محصول به لوله نهایی نزدیکتر خواهد بود. نزدیک بودن انحنای نسبی به صفر، نشان‌دهنده تغییرشکل اعمالی ناچیز است. با توجه به این امر، مناطقی که انحنای نسبی در آن‌ها از ۰/۲کمتر باشد به عنوان مناطق خم نشده (Non-bending area) در نظر گرفته شدند.



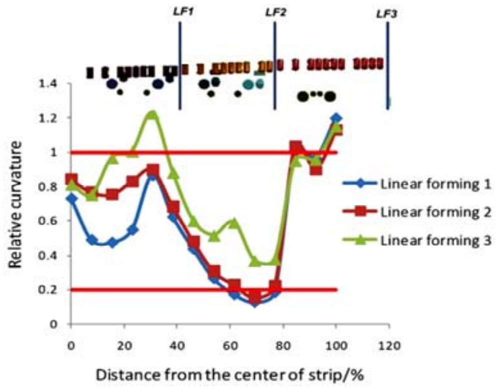
شکل۱٤ الگوی گل شکل‌دهی قفسه‌ای لوله

شکل (۱۵) توزیع انحنا را پس از مراحل شکل‌دهی لبه و پیش شکل‌دهی نشان می‌دهد. مطابق انتظار در مرحله شکل‌دهی لبه، تنها ناحیه نزدیک به لبه ورق شکل گرفته است و انحنای آن تا قبل از مرحله پره‌ای ثابت باقی می‌ماند و بقیه ناحیه‌ها در زمره نواحی خم نشده قرار می‌گیرند.



شکل۱۵ توزیع انحنا نسبی در مقطع عرضی ورق تغییرشکل یافته در مراحل شکل‌دهی لبه و پیش شکل‌دهی

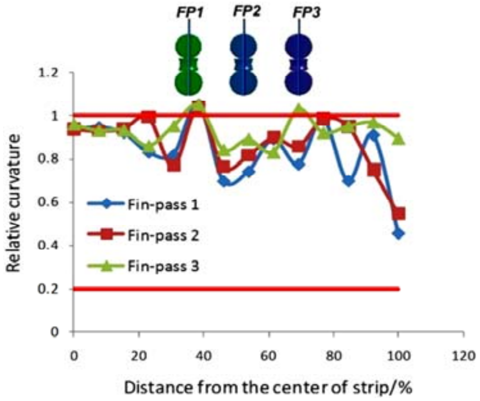
در مرحله پیش‌شکل‌دهی به علت اثر غلتک‌های بالایی و فشاری به تدریج انحنای ناحیه مرکزی نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین در این مرحله در گستره فاصله‌ای ۷۶٪–۴۳٪ از مرکز ورق نواحی خم‌نشده مشاهده می‌شوند. با ورود ورق به مرحله شکل‌دهی خطی (شکل ۱۶) نواحی خم نشده به‌تدریج کاهش می‌یابند به‌گونه‌ای که این نواحی در انتهای سومین مرحله شکل‌دهی خطی به طور کامل ناپدید می‌شوند. اما هم‌چنان توزیع غیریکنواختی در انحنای ورق تغییرشکل‌یافته وجود دارد. نواحی خم‌نشده در انتهای مرحله اول و دوم شکل‌دهی خطی در گستره فاصله‌ای ۷۶٪–۶۰٪ و ۷۵٪–۶۶٪ از مرکز مشاهده می‌شوند.



شکل۱۶ توزیع انحنای نسبی در مقطع عرضی ورق تغییرشکل یافته در مرحله شکل‌دهی خطی

شکل (۱۷) توزیع انحنای نسبی ورق تغییرشکل یافته در مرحله پره‌ای را نشان می‌دهد. در این مرحله توزیع انحنا بسیار یکنواخت‌تر شده و پس از ایستگاه سوم پره‌ای، بسیار به یک، لوله گرد، نزدیک می‌شود.

مقادیر جدول (۱) مربوط به میانگین انحنای نسبی و انحراف از معیار آن در ایستگاه‌های پره‌ای است. میانگین انحنای نسبی در مرحله پره‌ای به‌تدریج افزایش می‌یابد به نحوی که در ایستگاه سوم پره‌ای میانگین انحنای نسبی به ۰/۹۲۹ می‌رسد. افزایش میانگین انحنای نسبی تا انحنای لوله نهایی در مراحل جوش و به اندازه رساندن لوله کامل می‌شود. هم‌چنین در مرحله پره‌ای انحراف از معیار که نشان‌دهنده پراکندگی توزیع انحنا در مقطع عرضی ورق تغییرشکل یافته می‌باشد، به سمت صفر میل می‌کند.



شکل۱۷ توزیع انحنا نسبی در مقطع عرضی ورق تغییرشکل یافته در مرحله پره‌ای

جدول۱ میانگین و انحراف از معیار انحنای نسبی در مرحله پره‌ای

نام ایستگاه	میانگین انحنای نسبی	انحراف از معیار
ایستگاه اول پره‌ای	۰/۸۳٤	۰/۰۲۳
ایستگاه دوم پره‌ای	۰/۸۷	۰/۰۱۷
ایستگاه سوم پره‌ای	۰/۹۲۹	۰/۰۰٤

مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی

برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی، هندسه ورق تغییرشکل یافته و توان مصرفی در خط شکل‌دهی قفسه‌ای کارخانه نورد و لوله صفا مورد اندازه‌گیری قرار گرفت تا از این طریق بتوان از صحت مدل و هم‌چنین شبیه‌سازی‌های انجام شده اطمینان حاصل کرد.

هندسه ورق تغییرشکل یافته. برای بررسی هندسه ورق تغییرشکل یافته، محیط خارجی ورق و هم‌چنین فاصله افقی دو لبه ورق در موقعیت‌های مختلف خط

تولید، مورد انـدازه‌گیـری قـرار گرفـت کـه چگـونگی اندازه‌گیری این پارامترهـا در شـکل (۱۹ و ۱۸) نشـان داده شده است.



شکل ۱۸ نحوه اندازه‌گیری محیط خارجی ورق تغییرشکل یافته



شکل ۱۹ نحوه اندازه‌گیری فاصله افقی دو لبه ورق

جدول (۳ و۲) به‌ترتیب مقایسه محـیط خـارجی و فاصـله افقـی دو لبـه ورق را در شـبیه‌سـازی اجـزای محدود و خط تولید نشان می‌دهد. با توجه به کوچـک بودن بیشینه خطـا در دو جـدول (۳ و۲) مـی‌تـوان بـه صحت نتایج شبیه‌سازی اطمینان کرد.

مطابق جدول (۲) بیشترین افزایش محیط خـارجی ورق در مرحله شکل‌دهی لبه گزارش شـده اسـت کـه همان‌طورکه اشاره شـد ایـن تغییرشـکل شـدید سـبب افزایش قابـل تـوجهی در کـرنش طـولی و هـم‌چنـین کارسختی در ناحیه لبه ورق می‌شـود. محـیط خـارجی ورق در ناحیـــه قفســـه‌ای افـــزایش ملایمـــی را نشـــان می‌دهد. میزان کاهش محیط خارجی به‌دسـت آمـده از نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی در مرحله پره‌ای بـه صورت تقریبی برابر بـا ۳ میلـی‌متـر مـی‌باشـد کـه در مقایسه با لوله‌هایی با نسبت ضخامت به قطر بالا مقدار کمی می‌باشد. زیرا در شکل‌دهی لولـه‌هـایی بـا نسـبت ضخامت به قطر پایین احتمال کمـانش لبـه در مرحلـه پره‌ای زیاد می‌باشد؛ بـه ایـن خـاطر از اعمـال کـاهش محیط خارجی زیاد در این مرحله خودداری مـی‌شـود. مطابق جدول (۳) فاصله افقی لبه ورق تا مرحله پـره‌ای با توجه به نحوه چیدمان غلتک‌های قفسه‌ای به‌صـورت خطی کاهش می‌یابد. هم‌چنـین بـه علـت ایـن کـه در مرحله غلتـک کشـنده، ورق کـاملاً تخـت مـی‌باشـد و تغییرشکلی بر آن اعمال نمی‌شود، درصد خطای نتـایج شبیه‌سازی صفر می‌باشد.

جدول ۲ مقایسه محیط خارجی ورق به‌دست آمده از نتایج شبیه‌سازی و تجربی

(D=٦۰۹/٦ mm, t=۷/۹٥mm, مصالح=X٥۲)				
موقعیت اندازه‌گیری		محیط خارجی‌ورق: شبیه‌سازی	محیط خارجی‌ورق: تجربی	درصد خطا(٪)
مرحله کشنده		۱۹۱٤	۱۹۱٤	۰
شکل‌دهی لبه		۱۹۲۰/۹	۱۹۲۳/٦	۰/۱٤
پیش شکل‌دهی		۱۹۲٥/۳	۱۹۲٦	۰/۰٤
شکل‌دهی خطی	اول	۱۹۲۹/٥	۱۹۲۸/٤	۰/۰٥
	دوم	۱۹۳۰/۸	۱۹۳۳/۲	۰/۱۲
	سوم	۱۹۳٤/۹	۱۹۳٥/٦	۰/۰۳
مرحله پره‌ای		۱۹۳۱	۱۹۳۲	۰/۱۰

جدول ۳ مقایسه بین فاصله افقی دو لبه ورق به‌دست آمده از نتایج شبیه‌سازی و تجربی

(D=٦۰۹/٦ mm, t=۷/۹٥mm, مصالح=X٥۲)				
موقعیت اندازه‌گیری		فاصله افقی دو لبه: شبیه‌سازی	فاصله افقی دو لبه: تجربی	درصد خطا(٪)
شکل‌دهی لبه		۱۸٥۱	۱۸۸٥	۱/۸
پیش شکل‌دهی		۱٥۲۸	۱٥۷۸	۳/۱۷
شکل‌دهی خطی	اول	۱۱۱۲	۱۰۷۱	۳/۸۳
	دوم	۷۹۰	۷٤٥	٦/۰٤
	سوم	۳۷۸	۳٦۳	٤/۱۳

توان شکل‌دهی. گشتاوری که به غلتک‌های شکل‌دهی حول محور آن‌ها وارد می‌شود در واقع عامل شکل‌دهی بر روی ورق می‌باشد. از طرفی طبق رابطه (۱) با تغییر مقدار گشتاورها (T)، توان مصرفی (P) در هر غلتک برای شکل‌دهی عوض می‌شود. در این رابطه ω سرعت دورانی غلتک می‌باشد. به همین دلیل توجه به مقدار گشتاورها در غلتک‌های ایستگاه‌های مختلف شکل‌دهی از اهمیت بالایی برخوردار است.

$$P = T\,\omega \tag{۱}$$

برای محاسبه توان شکل‌دهی در شبیه‌سازی اجزای محدود، گشتاورهای وارد شده به غلتک بالایی و پایینی در ایستگاه‌های پره‌ای از نرم‌افزار مارک منتات استخراج شد. متوسط گشتاورهای به‌دست آمده به‌عنوان گشتاور وارد شده به غلتک‌ها در نظر گرفته شد. بدین ترتیب با دانستن سرعت دورانی و گشتاور وارد شده به هر غلتک، توان شکل‌دهی از رابطه (۱) محاسبه شد.

به منظور به‌دست آوردن توان شکل‌دهی در خط تولید، لازم است که شدت جریان مصرفی هر یک از موتورهای غلتک‌های بالایی و پایینی ایستگاه‌های پره‌ای اندازه‌گیری شود. سیستم کنترلر SIEMENS دستگاه شکل‌دهی قفسه‌ای، امکان نمایش و ثبت شدت جریان‌های مصرفی هر یک از موتورها را به هنگام تولید فراهم می‌کرد. از این رو با استفاده از این قابلیت سیستم کنترلر، شدت جریان موتورهای غلتک‌های محرک مرحله پره‌ای به صورت همزمان و در بازه‌های زمانی مشخص ثبت گردید.

با توجه به این که موتورهای خط تولید از نوع DC می‌باشند، برای محاسبه توان شکل‌دهی از رابطه (۲) استفاده شد که در آن V ولتاژ، I شدت جریان و η بازده موتور می‌باشد.

$$P = V.I.\eta \tag{۲}$$

برای محاسبه توان موتورهای خط شکل‌دهی قفسه‌ای با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده، از شدت جریان متوسط استفاده شد. هم‌چنین با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده و اطلاعات مربوط به کاتالوگ‌های موتورهای مورد استفاده، ولتاژ ۴۲۰ ولت و بازده (η) ۰/۹ در نظر گرفته شد.

جدول (٤) مقایسه بین توان‌های شکل‌دهی در شبیه‌سازی اجزای محدود و آنچه که در خط تولید اندازه‌گیری شده است را نشان می‌دهد. درصد خطای کم نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی به‌خوبی صحت شبیه‌سازی‌ها را تأیید می‌کند. بیشترین توان شکل‌دهی مربوط به غلتک پایینی ایستگاه اول پره‌ای است؛ زیرا خط پایین لوله که تا انتهای مرحله شکل‌دهی خطی روندی نزولی را طی کرده است تا قبل از مرحله پره‌ای مقداری به سمت بالا حرکت می‌کند که این باعث اعمال نیروی شدید و افزایش گشتاور در غلتک پایینی ایستگاه اول پره‌ای می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند شکل‌دهی قفسه‌ای لوله‌هایی با نسبت ضخامت به قطر پایین، ٪۱/۳، به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود مارک‌منتات شبیه‌سازی شد. به منظور بررسی عیب کمانش لبه، کرنش طولی در لبه و مرکز ورق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت کرنش طولی در لبه و مرکز ورق در ایستگاه شکل‌دهی لبه زیاد می‌باشد و ناحیه لبه ورق دچار تغییرشکل پلاستیک می‌شود. در حالی‌که در مرحله پیش شکل‌دهی و شکل‌دهی خطی کرنش طولی در لبه و مرکز ورق به‌صورت الاستیک باقی می‌ماند. با ادامه تغییرشکل در مرحله پره‌ای، تفاوت کرنش طولی در لبه و مرکز ورق در هر یک از ایستگاه‌های این مرحله دوباره به شدت افزایش یافته و کرنش طولی لبه ورق از محدوده الاستیک خارج می‌شود. بیشینه کرنش طولی در ایستگاه اول پره‌ای روی می‌دهد و برابر با ۰/۰۱۹۷ می‌باشد. بنابراین مرحله شکل‌دهی لبه و پره‌ای به عنوان مکان‌های مستعد برای کمانش لبه ورق معرفی شدند. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، الگوی گل ورق و هم‌چنین انحنای ورق تغییرشکل‌یافته در مراحل مختلف شکل‌دهی پیش‌بینی شد. فاکتور بی‌بعدی با عنوان انحنای نسبی

تعریف گردید و ناحیه‌هایی از پروفیل ورق که انحنای نسبی کمتر از ۰/۲ دارند به‌عنوان نواحی خم‌نشده معرفی شدند. نواحی خم‌نشده در مرحله پیش شکل‌دهی و مراحل اول و دوم شکل‌دهی خطی در گستره فاصله‌ای ۷۶٪-۴۳٪، ۷۶٪-۶۰٪ و ۷۵٪-۶۶٪ از مرکز ورق مشاهده شدند. با وجود حذف نواحی خم‌نشده در مرحله سوم شکل‌دهی خطی، توزیع انحنا در انتهای این مرحله شرایط نامناسب و غیریکنواخت دارد. هم‌چنین مشاهده شد که با ورود ورق به مرحله پره‌ای پروفیل ورق تغییرشکل یافته اصلاح می‌شود؛ به نحوی که میانگین انحنای نسبی به‌تدریج به یک نزدیک شده و انحراف از معیار آن به سمت صفر میل می‌کند. میانگین انحنای نسبی در ایستگاه سوم پره‌ای برابر با ۰/۹۲۹ و انحراف از معیار آن ۰/۰۰۴ به‌دست آمد. محیط خارجی، فاصله افقی دو لبه و توان شکل‌دهی در مراحل مختلف شکل‌دهی از نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمد و با داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده در خط تولید مقایسه شد که انطباق بسیار خوب این نتایج، صحت نتایج شبیه‌سازی را تأیید کرد.

جدول ٤ مقایسه توان شکل‌دهی استخراج شده از شبیه‌سازی اجزای محدود با توان شکل‌دهی اندازه‌گیری شده از خط تولید

(D= ۵۰۸mm, t=۹/۵۳mm, مصالح=X٦۰)							
ایستگاه پره‌ای	غلتک	شبیه‌سازی اجزای محدود			نتایج تجربی		خطا
		سرعت دورانی (rad/s)	گشتاور ($N.mm$)	توان شکل‌دهی (W)	شدت جریان (A)	توان شکل‌دهی (W)	
اول	بالایی	۰/٦۰۹	۵۱۲۸/۳	۳۱۲۲/۹	۷/٦۱	۲۸۷۸/۵۸	٪۸/۵
اول	پایینی	۰/۵۹۵	۳۲۳۵۲/٤	۱۹۲٤۹/٤٤	۵٤/۷۹	۲۰۷۱۲/۳۷	٪۷
دوم	بالایی	۰/٦۰٦	۹۱٦۷	۵۵۵۵/۲	۱۵/۱۹	۵۷٤۵	٪۳/۳
دوم	پایینی	۰/۵۹۸	۱۷۹۷٦	۱۰۷۵۰/۷	۲۷/٤٦	۱۰۳۸۱/٤۵	٪۳/۵
سوم	بالایی	۰/٦۰٤	٦٦۵٤/۲	٤۰۱۹/۱	۱۰/۵۲	۳۹۷۷/۱۸	٪۱
سوم	پایینی	۰/٦۰۲	۵٦۷٦	۳٤۱٦/۹	۸/٦۱	۳۲۵۷/۲	٪٤

مراجع

1. Yokoyama, E., Toyooka, T., Ejima, A., Yoshimoto, Y., Kawate, T. and Kumata, K., "Steel sheet deformation behavior and forming load determination in the 26-inch cage forming ERW pipe mill", Kawasaki steel technical report, No. 4, Kawasaki, pp. 72–83, (1981).
2. Jiang, J., Li, D., Peng, Y. and Li, J., "Research on strip deformation in the cage roll forming process of ERW round pipes", *Journal of Materials Processing Technology*, 209, pp. 4850–4856, (2009).
3. Kiuchi, M., "Analytical study on cold roll forming process", the Institute of Industrial Science Report, No. 23, Tokyo, pp. 1–43, (1973).
4. Kiuchi, M. and Koudabashi, T., "Automated design system of optimal roll profiles for cold roll forming", *3rd International Conference on Rotary Metalworking Processes*, Kyoto, Japan, pp. 423–436, (1984).
5. Kiuchi, M., "Optimum design of fin-rolls and fin pass-schedule of roll forming of pips", *Tomorrows tube-international conference & exposition*, Birmingham, England, (1986).

6. Walker, T. R. and Pick, R. J., "Approximation of the axial strains developed during the roll forming of ERW pipe", *Journal of Materials Processing Technology*, 22, pp. 29–44, (1990).

7. Walker, T. R. and Pick, R. J., "Developments in the geometric modeling of an ERW pipe skelp", *Journal of Materials Processing Technology*, 25, pp. 35–54, (1991).

۸. مسلمی نائینی، حسن، "طراحی غلتک‌های فرآیند شکل‌دهی غلتکی سرد لوله به کمک کامپیوتر"، دانشگاه تربیت مدرس، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، (۱۳۷۲).

9. Liu, C., Zhou, Y. and P Lu, W., "Numerical simulation of roll-forming by B-spline finite strip method", *Journal of Materials Processing Technology*, 60, pp. 215–21, (1996).

10. Han, Z. W., Liu, C., Lu, W. P., Ren, L.Q. and Jin, T., "Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes", *Journal of Materials Processing Technology*, 145, pp. 311–316, (2004).

11. Kiuchi, M. and Wang, F. Z., "FEM simulation of roll-forming of ERW pipes and mill/process design", *6th the International Conference on Technology of Plasticity*, Nuremberg, Germany, pp. 19–24, (1999).

12. Hong, M., Kim, D. S., Yoon, H. J. and Kim, N., "Development of roll forming simulation program", In Transactions of the Korean Society of CAD/CAM Engineers Annual Meeting, Seoul, Korea, pp. 417–423, (2000).

13. Kim, N., Kang, B. and Lee, S., "Prediction and design of edge shape of initial strip for thick tube roll forming using finite element method", *Journal of Materials Processing Technology*, 142, pp. 479–486, (2003).

14. Salmani Tehrani, M., Moslemi Naeini, H., Hartley, P. and Khademizadeh, H., "Localized edge buckling in cold roll-forming of circular tube section", *Journal of Materials Processing Technology*, 177, pp. 617-620, (2006).